加微信：642945106 发送“ 赠送 ”领取赠送精品课程
发数字“ 2 ”获取众筹列表

05 | 运行时机制：程序如何运行，你有发言权

2020-06-10 宫文学

讲述：宫文学
时长 21:58 大小 20.13M

你好，我是宫文学。在语义分析之后，编译过程就开始进入中后端了。

经过前端阶段的处理分析，编译器已经充分理解了源代码的含义，准备好把前端处理的结果（带有标注信息的 AST、符号表）翻译成目标代码了。

我在第 1 讲也说过，如果想做好翻译工作，编译器必须理解目标代码。而要理解目标代码，它就必须要理解目标代码是如何被执行的。通常情况下，程序有两种执行模式。

第一种执行模式是在物理机上运行。针对的是 C、C++、Go 这样的语言，编译器直接把源代码编译成汇编代码（或直接生成机器码），然后生成能够在操作系统上运行的可执行程序。为了实现它们的后端，编译器需要理解程序在底层的运行环境，包括 CPU、内存、操作系统跟程序的互动关系，并要能理解汇编代码。

第二种执行模式是在虚拟机上运行。针对的是 Java、Python、Erlang 和 Lua 等语言，它们能够在虚拟机上解释执行。这时候，编译器要理解该语言的虚拟机的运行机制，并生成能够被执行的 IR。

理解了这两种执行模式的特点，我们也就能弄清楚用高级语言编写的程序是如何运行的，进而也就理解了编译器在中后端的任务是什么。接下来，我们就从最基础的物理机模式开始学习吧。

在物理机上运行

在计算机发展的早期，科学家们确立了计算机的结构，并一直延续至今，这种结构就是**冯•诺依曼结构**。它的主要特点是：数据和指令不加区别，混合存储在同一个存储器中（即主存，或叫做内存）；用一个指令指针指向内存中指令的位置，CPU 就能自动加载这个位置的指令并执行。

在 x86 架构下，这个指针是 eip 寄存器（32 位模式）或 rip 寄存器（64 位模式）。一条指令执行完毕，指令指针自动增加，并执行下一条指令。如果遇到跳转指令，则跳转到另一个地址去执行。

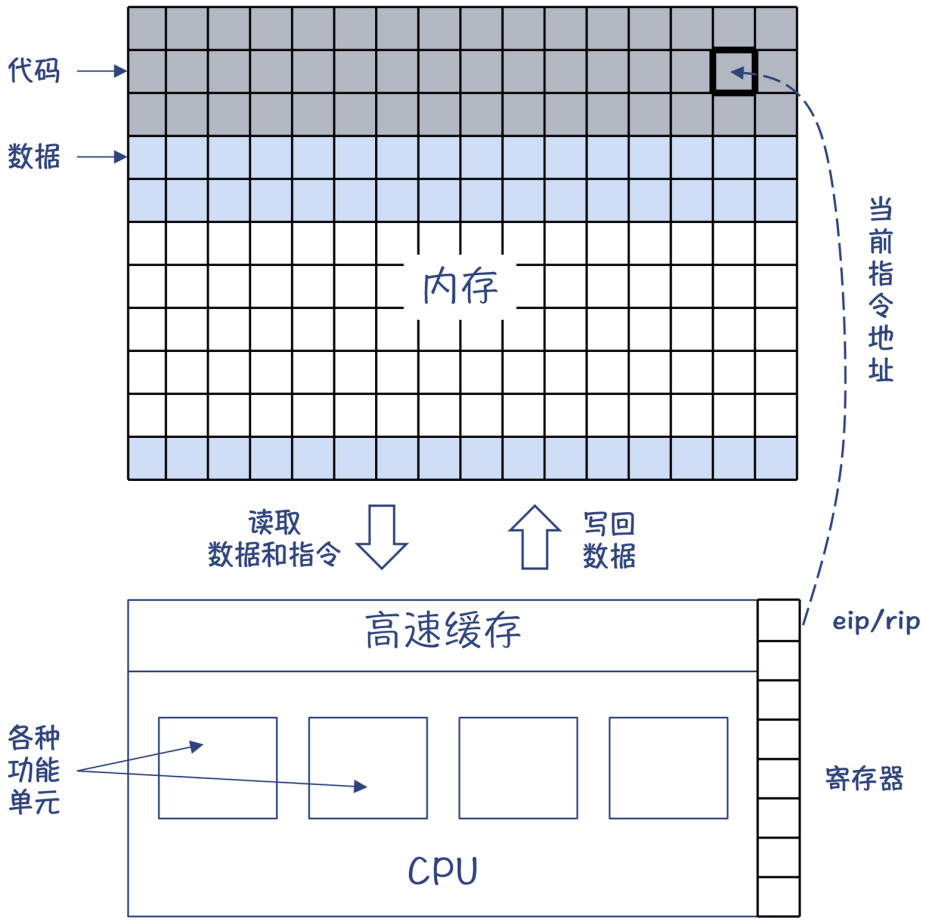


图 1：计算机的运行机制

这其实就是计算机最基本的运行原理。这样，你就可以在大脑中建立起像图 1 那样的直观结构。

通过图 1，你会看到，**计算机指令的执行基本上只跟两个硬件相关：一个是 CPU，一个是内存。**

CPU

CPU 是计算机的核心。从硬件构成方面，我们需要知道它的三个信息：

第一，CPU 上面有寄存器，并且可以直接由指令访问。寄存器的读写速度非常快，大约是内存的 100 倍。所以我们**编译后的代码，要尽量充分利用寄存器**，而不是频繁地去访问内存。

第二，CPU 有高速缓存，并且可能是多级的。高速缓存也比内存快。CPU 在读取指令和数据的时候，不是一次读取一条，而是读取相邻的一批数据，放到高速缓存里。接下来要读取的数据，很可能已经在高速缓存里了，通过这种机制来提高运行性能。因此，**编译器要尽量提高缓存的命中率**。

第三，CPU 内部有多个功能单元，有的负责计算，有的负责解码，等等。所以，一个指令可以被切分成多个执行阶段，每个阶段在不同的功能单元上运行，这为实现指令级并行提供了硬件基础。在第 8 讲，我还会和你详细解释这个话题。

防止断更 请务必加
首发微信：17161436655

好了，掌握了这个知识点，我们可以继续往下学习了。我们说，CPU 是运行指令的地方，**那指令到底是什么样子的呢?**

我们知道，CPU 有多种不同的架构，比如 x86 架构、ARM 架构等。不同架构的 CPU，它的指令是不一样的。不过它们的共性之处在于，指令都是 01 这样的机器码。为了便于理解，我们通常会用汇编代码来表示机器指令。比如，b=a+2 指令对应的汇编码可能是这样的：

复制代码

```
1 movl  -4(%rbp), %eax     #把%rbp-4内存地址的值拷贝到%eax寄存器
2 addl  $2, %eax           #把2加到%eax寄存器
3 movl  %eax, -8(%rbp)     #把%eax寄存器的值保存回内存，地址是%rbp-8
```

上面的汇编代码采用的是 GNU 汇编器规定的格式。每条指令都包含了两部分：**操作码（opcode）和操作数（oprand）**。

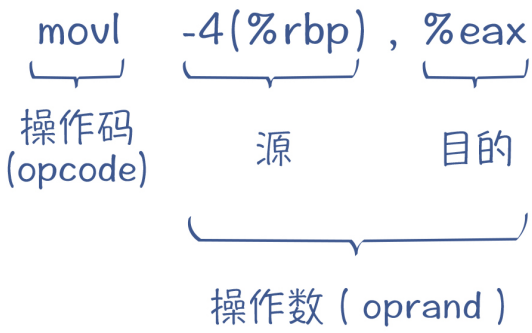


图 2：汇编代码示例

操作码是让 CPU 执行的动作。这段示例代码中，movl、addl 是助记符（Assembly Mnemonic），其中的 mov 和 add 是指令，l 是后缀，表示操作数的位数。

而操作数是指令的操作对象，它可以是常数、寄存器和某个内存地址。图 2 示例的汇编代码中，“$2”就是个常数，在指令里我们把它叫做立即数；而“%eax”是访问一个寄存器，其中 eax 是寄存器的名称；而带有括号的“-4(%rbp)”，则是对内存的访问方式，这个内存的地址是在 rbp 寄存器的值的基础上减去 4。

如果你还想对指令、汇编代码有更多的了解，可以再去查阅些资料学习，比如去参考下我的《编译原理之美》中的第22、23、31这几讲。

这里要提一下，虽然程序觉得自己一直在使用 CPU，但实际上，背后有操作系统在做调度。操作系统是管理系统资源的，而 CPU 是计算机的核心资源，操作系统会把 CPU 的时间划分成多个时间片，分配给不同的程序使用，每个程序实际上都是在“断断续续”地使用 CPU，这就是操作系统的**分时调度机制**。在后面课程里讨论并发的时候，我们会更加深入地探讨这个机制。

内存

好了，接下来我说说执行指令相关的另一个硬件：内存。

程序在运行时，操作系统会给它分配一块虚拟的内存空间，让它可以在运行期内使用。内存中的每个位置都有一个地址，地址的长度决定了能够表示多大空间，这叫做**寻址空间**。我们目前使用的都是 64 位的机器，理论上，你可以用一个 64 位的长整型来表示内存地址。

不过，由于我们根本用不了这么大的内存，所以 AMD64 架构的寻址空间只使用了 48 位。但这也有 256TB，远远超出了一般情况下的需求。所以，像 Windows 这样的操作系统还会给予进一步的限制，缩小程序的寻址空间。

$$
\begin{aligned}
&2^{48}\ \text{Byte} \\
=&2^{38}\ \text{K} \\
=&2^{28}\ \text{M} \\
=&2^{18}\ \text{G} \\
=&2^{8}\ \text{T} \\
=&256\text{T}
\end{aligned}
$$

图 3：48 位寻址空间有多大

但即使是在加了限制的情况下，程序在逻辑上可使用的内存一般也会大于实际的物理内存。不过进程不会一下子使用那么多的内存，只有在向操作系统申请内存的时候，操作系统才会把一块物理内存，映射成进程寻址空间内的一块内存。对应到图 4 中，中间一条是物理内存，上下两条是两个进程的寻址空间，它们要比物理内存大。

对于有些物理内存的内容，还可以映射进多个进程的地址空间，以减少内存的使用。比如说，如果进程 1 和进程 2 运行的是同一个可执行文件，那么程序的代码段是可以在两个进程之间共享的。你在图中可以看到这种情况。

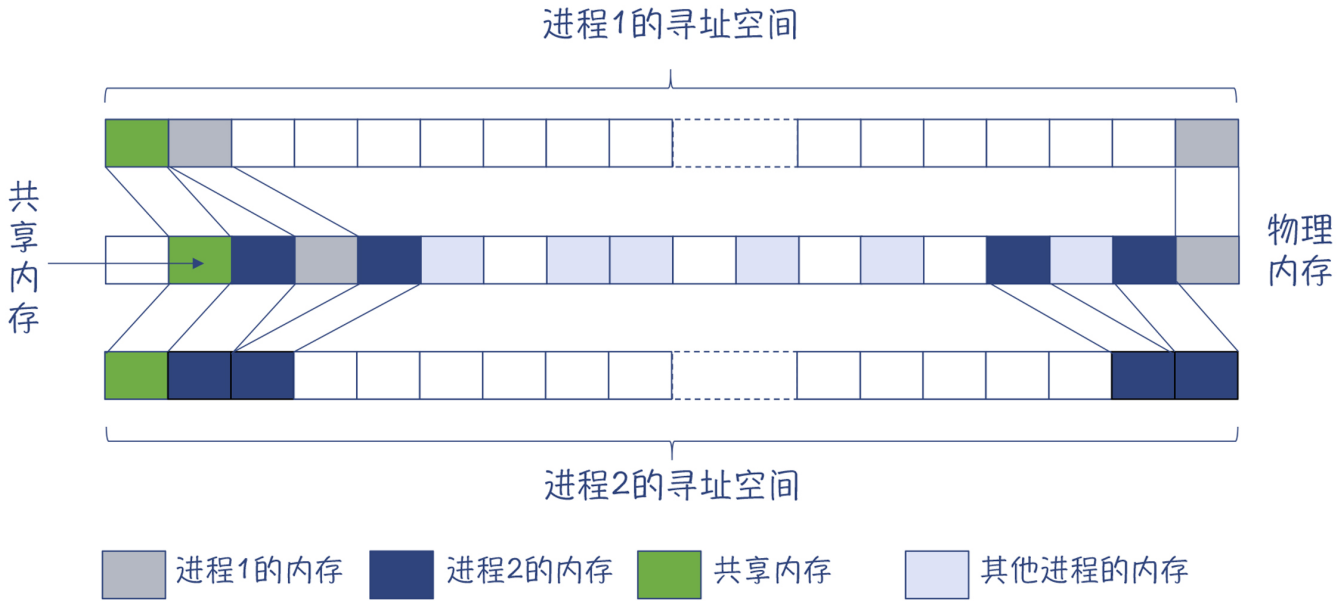


图 4：物理内存和逻辑内存的关系

另外，对于已经分配给进程的内存，如果进程很长时间不用，操作系统会把它写到磁盘上，以便腾出更多可用的物理内存。在需要的时候，再把这块空间的数据从磁盘中读回来。这就是操作系统的**虚拟内存机制**。

当然，也存在没有操作系统的情况，这个时候你的程序所使用的内存就是物理内存，我们必须自己做好内存的管理。

那么从程序角度来说，我们应该怎样使用内存呢？

本质上来说，你想怎么用就怎么用，并没有什么特别的限制。一个编译器的作者，可以决定在哪儿放代码，在哪儿放数据。当然了，别的作者也可能采用其他的策略。比如，C 语言和 Java 虚拟机对内存的管理和使用策略就是不同的。

不过尽管如此，大多数语言还是会采用一些通用的内存管理模式。以 C 语言为例，会把内存划分为代码区、静态数据区、栈和堆，如下所示。

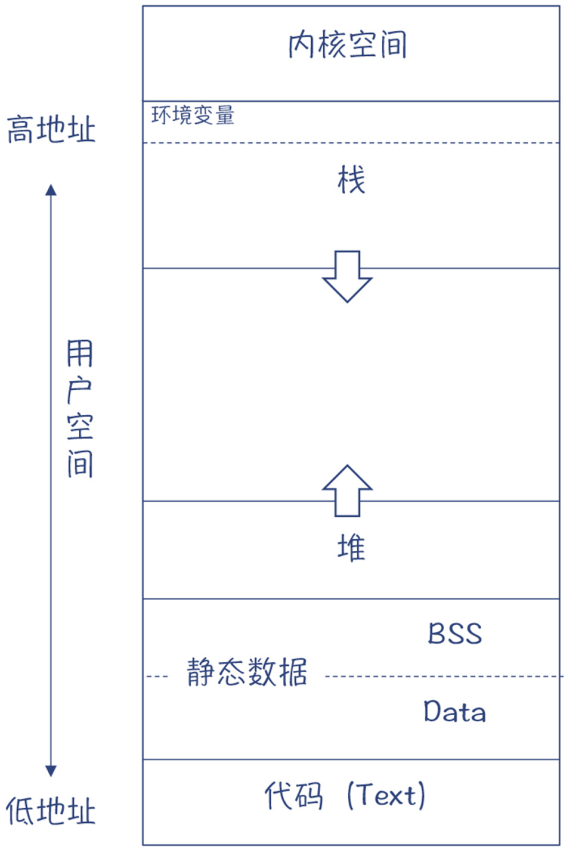


图 5：C 语言的内存布局方式

其中，代码区（也叫做文本段），主要存放编译完成后的机器码，也就是 CPU 指令；静态数据区会保存程序中的全局变量和常量。这些内存是静态的、固定大小的，在编译完毕以后就能确定清楚所占用空间的大小、代码区每个函数的地址，以及静态数据区每个变量和常量的地址。这些内存在程序运行期间会一直被占用。

而堆和栈，属于程序动态、按需获取的内存。我来和你分析下这两种内存。

我们先看看**栈**（Stack）。使用栈的一个好处是，操作系统会根据程序使用内存的需求，自动地增加或减少栈的空间。通常来说，操作系统会用一个寄存器保存栈顶的地址，程序可以修改这个寄存器的值，来获取或者释放空间。有的 CPU，还有专门的指令来管理栈，比如 x86 架构，会使用 push 和 pop 指令，把数据写入栈或弹出栈，并自动修改栈顶指针。

在程序里使用栈的场景是这样的，程序的运行可以看做是在逐级调用函数（或者叫过程）。像下面的示例程序，存在着 **main->bar->foo** 的调用结构，这也就是**控制流转移**的过程。

复制代码

```
1 int main(){
```

```
  int a = 1;
  foo(3);
  bar();
}

int foo(int c){
    int b = 2;
    return b+c;
}

int bar(){
    return foo(4) + 1;
```

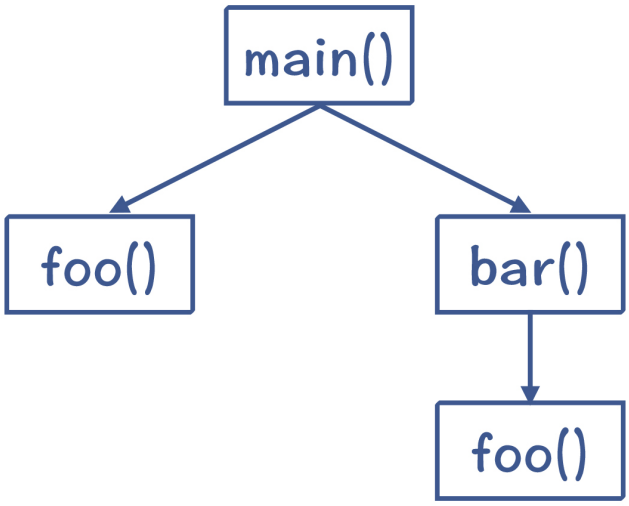


图 6：程序逐级调用的过程

每次调用函数的过程中，都需要一些空间来保存一些信息，比如参数、需要保护的寄存器的值、返回地址、本地变量等，这些信息叫做这个过程的**活动记录**（Activation Record）。

注意，活动记录是个逻辑概念。在物理实现上，一些信息可以保存在寄存器里，使得性能更高。比如说依据一些约定，返回值和少于 6 个的参数，是通过寄存器传递的。这里所说的“依据约定”，是指在调用一个函数时，如何传递参数、如何设定返回地址、如何获取返回值的这种约定，我们把它称之为 ABI（Application Binary Interface，应用程序二进制接口）。利用 ABI，使得我们可以用一种语言写的程序，去调用另外的语言写的程序。

另一些信息会保存在栈里。每个函数（或过程）在栈里保存的信息，叫做**栈帧**（Stack Frame）。我们可以自由设计栈帧的结构，比如，下图就是一种常见的设计：

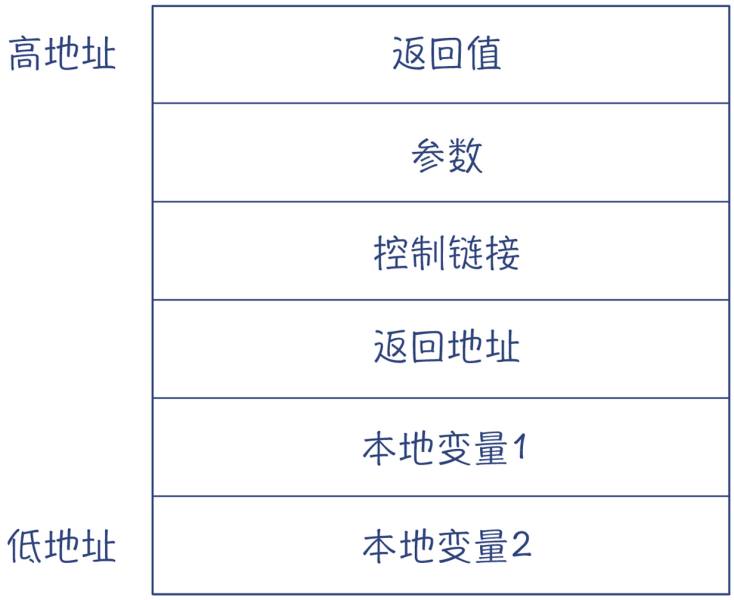


图 7：一种可能的栈帧结构

返回值：一般放在最顶上，这样它的地址是固定的。foo 函数返回以后，它的调用者可以到这里来取到返回值。在实际情况中，ABI 会规定优先通过寄存器来传递返回值，比通过内存传递性能更高。

参数：在调用 foo 函数时，我们把它所需要一个整型参数写到栈帧的这个位置。同样，我们也可以通过寄存器来传递参数，而不是通过内存。

控制链接：就是上一级栈帧（也就是 main 函数的栈帧）的地址。如果该函数用到了上一级作用域中的变量，那么就可以顺着这个链接找到上一级作用域的栈帧，并找到变量的值。

返回地址： foo 函数执行完毕以后，继续执行哪条指令。同样，我们可以用寄存器来保存这个信息。

本地变量： foo 函数的本地变量 b 的存储空间。

寄存器信息：我们还经常在栈帧里保存寄存器的数据。如果在 foo 函数里要使用某个寄存器，可能需要先把它的值保存下来，防止破坏了别的代码保存在这里的数据。**这种约定叫做被调用者责任，**也就是使用寄存器的函数要保护好寄存器里原有的信息。某个函数如果使用了某个寄存器，但它又要调用别的函数，为了防止别的函数把自己放在寄存器中的数据覆盖掉，这个函数就要自己把寄存器信息保存在栈帧中。**这种约定叫做调用者责任。**

对于示例程序，在多级调用以后，栈里的信息可能是下面这个样子。如果你想看到这个信息，通常可以在调试程序的时候打印出来。

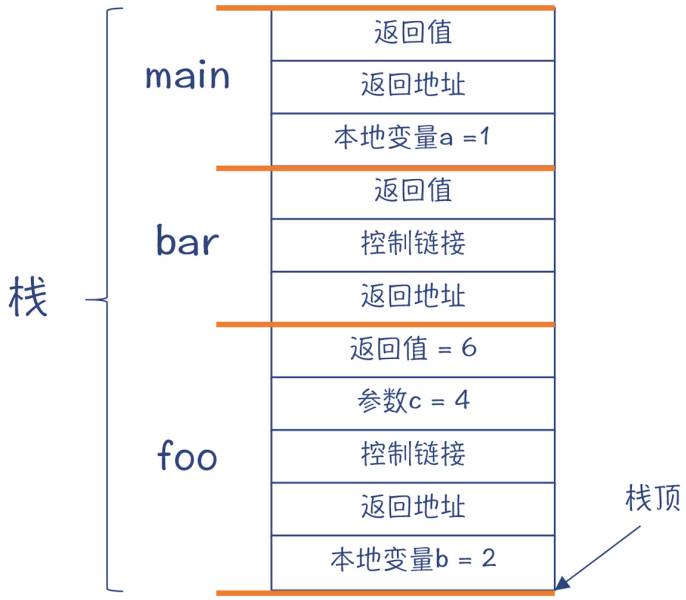


图 8：一个运行中的栈的示例

理解了栈的机制以后，我们再来看看动态获取内存的第二种方式：**堆**（Heap）。

操作系统一般会提供一个 API，供应用申请内存。当应用程序用完之后，要通过另一个 API 释放。如果忘记释放，就会造成内存越用越少，这叫做**内存泄漏**。

相对于栈来说，这是堆的一个缺点。不过，相应的好处是，**应用在堆里申请的对象的生存期，可以由自己控制，不会像栈里的内存那样，在退出作用域之后就被自动收回。**所以，如果数据的生存期超过了创建它的作用域的生存期，就必须在堆中申请内存。

扩展：反之，如果数据的生存期跟创建它的作用域一致的话，那么在栈里和堆里申请都是可以的。当然，肯定在栈里申请更划算。所以，编译优化中的逃逸分析，本质就是分析出哪些对象的生存期是跟函数或方法的生存期一致的，那么就不需要到堆里申请了。

另外，在并发的场景下，由于栈是线程独享的，而堆是多个线程共享的，所以在堆里申请内存的效率会更低，因为需要在多个线程之间同步，避免出现竞争。

那为了避免内存泄漏，在设计一门语言的时候，通常需要提供内存管理的方案。

一种方案是像 C 和 C++ 那样，由程序员自己负责内存的释放，这对程序员的要求就比较高。另一种方案是，像 Java 语言那样自动地管理内存，这个特性也叫做**垃圾收集**。垃圾收集是语言的运行时功能，能够通过一定的算法来回收不用的内存。

总结起来，在计算机上运行一个程序，我们需要跟两个硬件打交道：一个是 CPU，它能够从内存中读取指令并顺序执行；第二个硬件是内存，内存使用模式有栈和堆两种方式，两种方式有各自的优点和适用场景。

运行时系统

除了硬件支撑，程序的运行还需要软件，这些软件叫做**运行时系统**（Runtime System），或者叫**运行时**（Runtime）。前面我们提到的垃圾收集器，就是一个运行时的软件。进行并发调度的软件，也是运行时的组成部分。

实际上，对于把源代码编译成机器码在操作系统上运行的语言来说（比如 C、C++），操作系统本身就可以看做是它们的运行时系统。它可以帮助程序调度 CPU 资源、内存资源，以及其他一些资源，如 IO 端口。

但也有很多语言，比如 Java、Python、Erlang 和 Lua 等，它们不是直接在操作系统上运行的，而是运行在虚拟机上。那么它们的执行模式有什么特点？对编译有什么影响呢？

在虚拟机上运行

虚拟机是计算机语言的一种运行时系统。虚拟机上运行的是**中间代码**，而不是 CPU 可以直接认识的指令。

虚拟机有两种模型：一种叫做**栈机**（Stack Machine），一种叫做**寄存器机**（Register Machine）。它们的区别，主要在于如何获取指令的操作数。

栈机是从栈里获取，而寄存器机是从寄存器里获取。这两种虚拟机各有优缺点。

基于栈的虚拟机

首先说说栈机。JVM 和 Python 中的解释器，都采用了栈机的模型。在本讲中，我主要介绍 Java 的虚拟机的运行机制。

JVM 中，每一个线程都有一个 JVM 栈，每次调用一个方法都会生成一个栈帧，来支持这个方法的运行。这跟 C 语言很相似。但 JVM 的栈帧比 C 语言的复杂，它包含了一个本地变量数组（包括方法的参数和本地变量）、操作数栈、到运行时常量池的引用等信息。

对比 JVM 的栈帧和 C 语言栈帧的设计，你应该得到一些启示：栈帧的结构是语言的作者可以自己设计的，没有什么死规定。所以我们学知识也不要学死了，以为栈帧只有一种结构。

注意，我们这里提到了两个栈，一个是类似于 C 语言的栈的方法栈，另一个是方法栈里每个栈帧中的操作数栈。而我们说的栈机中的“栈”，指的是这个操作数栈，不要弄混了。

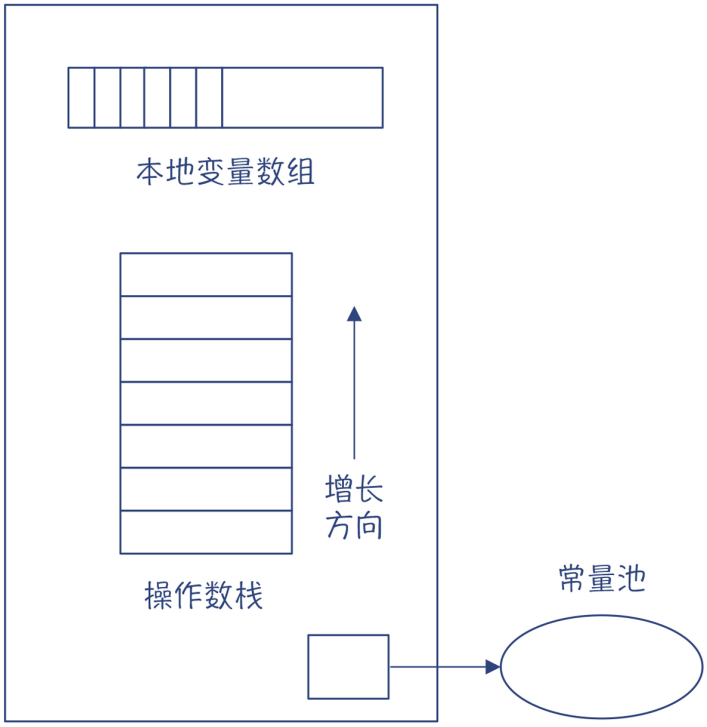


图 9：JVM 中一个栈帧的结构

对于每个指令，解释器先要把它的操作数压到栈里。在执行指令时，从栈里弹出操作数，计算完毕以后，再把结果压回栈里。

以“2+3*5”为例，它对应的栈机的代码如下：

复制代码

```
push 2   //把操作数2入栈
push 3   //把操作数3入栈
push 5   //把操作数5入栈，栈里目前是2、 3、 5
imul     //弹出5和3，执行整数乘法运算，得到15，然后把结果入栈，现在栈里是2、15
```

```
5
```

提示：对于不同大小的常量操作数，实际上生成的指令会不同。这里只是示意。

注意一点，要从 AST 生成上面的代码，你只需要对 AST 做深度优先的遍历即可。先后经过的节点是：**2->3->5->*->+**（注：这种把操作符放在后面的写法，叫做**逆波兰表达式**，也叫**后缀表达式**）。

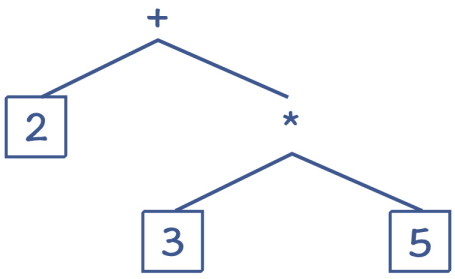


图 10：2+3*5 对应的 AST

生成上述栈机代码，只需要深度优先地遍历 AST，并且只需要进行两种操作：

在遇到字面量或者变量的时候，生成 push 指令；

在遇到操作符的时候，生成相应的操作指令即可。

你能看出，这个算法相当简单，这也是栈机最大的优点。

你还会注意到，像 imul 和 iadd 这样的指令，不需要带操作数，因为指令所需的操作数就在栈顶。这是栈机的指令跟汇编语言的指令的最大区别。

注意：imul 和 iadd 中的 i，代表这两个指令是对整型值做操作。对浮点型、长整型等不同类型，分别对应不同的指令前缀。

好了，现在你已经了解了栈机的原理。基于对栈机的认知，你再去阅读 Java 和 Python 的字节码，就会更加容易了。而关于 Python 的虚拟机，我还会在后续课程中详细展开。

基于寄存器的虚拟机

除了栈机之外，另一种虚拟机是寄存器机。寄存器机使用寄存器名称来表示操作数，所以它的指令也跟汇编代码相似，像 add 这样的操作码后面要跟操作数。

在实践中，早期版本的安卓系统中，用于解释执行代码的 Dalvik 虚拟机，就采用了寄存器模式，而 Erlang 和 Lua 语言的虚拟机也是寄存器机。JavaScript 引擎 V8 的比较新的版本中，也引入了一个解释器 Ignition，它也是个寄存器机。

与栈机相比，利用寄存器机编译所生成的代码更少，因为省去了很多 push 指令。

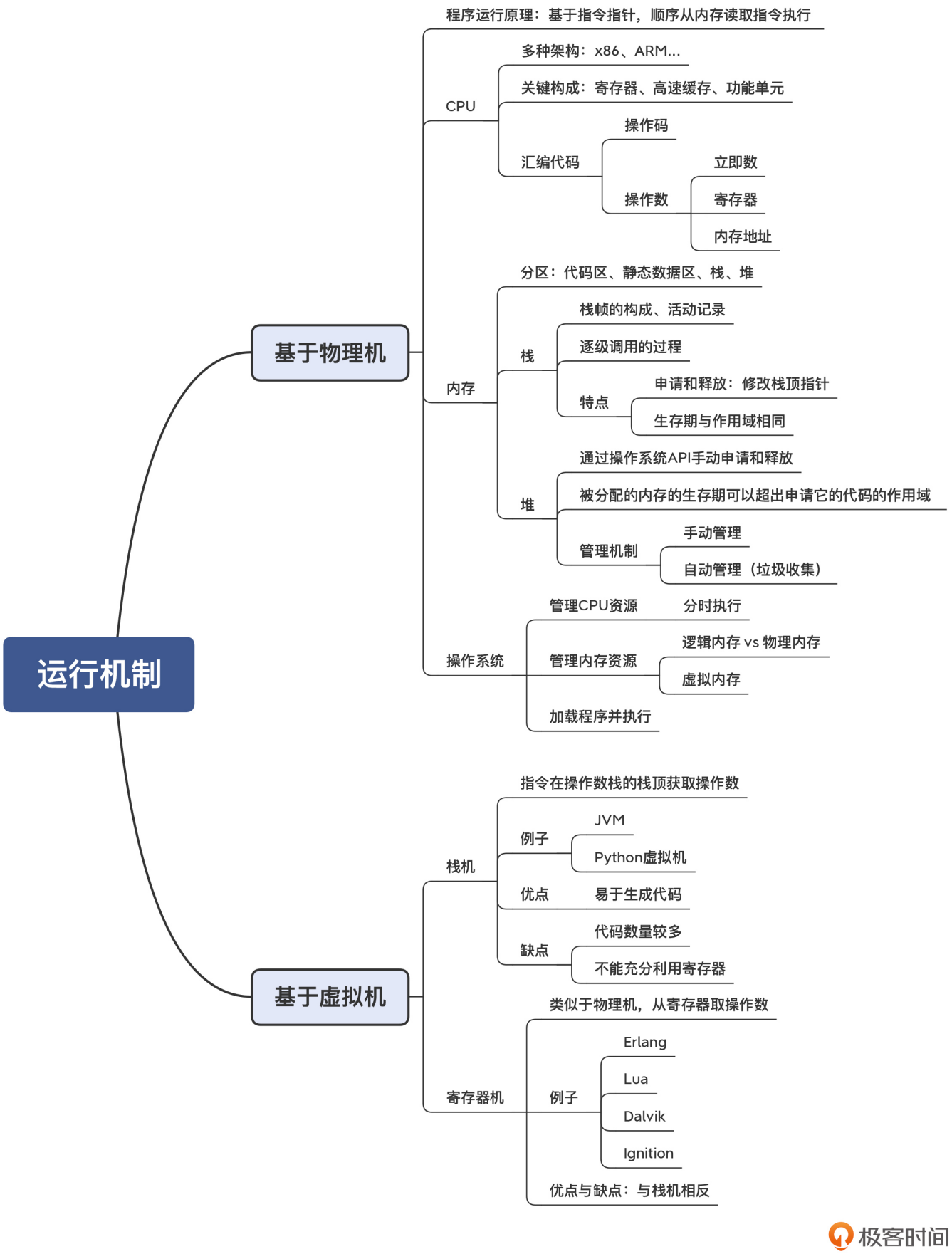
不过，寄存器机所指的寄存器，不一定是真正的物理寄存器，有可能只是栈帧中的一个位置。当然，有的寄存器机在实现的时候，确实会用到物理寄存器，从而提高计算性能。我们在后面研究 V8 的 Ignition 解释器时，会看到这种实现。

课程小结

本讲我带你了解了代码是如何被运行的，以及是在什么样的环境中运行的。这样，你才会知道如何让编译器生成正确的代码。

现有的程序有两大类执行模式。**一类是编译成本地代码（机器码），运行在物理机和操作系统上**，这时候你需要掌握目标机器的汇编代码，知道指令是如何跟 CPU 和内存打交道的，也需要知道操作系统在其中扮演了什么角色。**另一大类是在虚拟机上运行的**，虚拟机又分为栈机和寄存器机两大类，你需要明确它们之间的区别，才能知道为什么它们的 IR 是不同的，又分别有什么优缺点。

不过，现代程序的运行环境往往比较复杂。像 Java 等语言，既可以解释执行字节码，又能够即时编译成本地代码运行，所以它们的运行时机制就更复杂一些。你要综合两种运行时机制的知识，才能完整地理解 JVM。



一课一思

我们现在已经知道，栈是一种自动管理内存的机制，你只要修改栈顶指针，就可以获得所需的内存。那么，你能否结合操作系统的知识，研究一下这个过程是如何实现的呢？

欢迎在留言区分享你的答案，如果这节课对你有帮助，也欢迎你把它分享给你的朋友。

参考资料

1. 关于 JVM 栈帧的结构，可以参考 JVM Specification。

2. 关于 Java 字节码的指令集，可以参考 Java Language Specification。

© 版权归极客邦科技所有，未经许可不得传播售卖。 页面已增加防盗追踪，如有侵权极客邦将依法追究其法律责任。

上一篇　04 | 语义分析：让程序符合语义规则

下一篇　06 | 中间代码：不是只有一副面孔

精选留言 (5)

写留言

humor
2020-06-12

看有的资料上说进程的用户态内存段除了代码段，数据段，堆以及栈之外还有一个文件映射段，但是我看老师的图里怎么没有文件映射段呢？是省略掉了吗

展开

ヾ(◍°∇°◍)ﾉﾞ

2020-06-12

现在.net core 貌似发展趋势也越来越好，有空会讲讲嘛?

作者回复: 篇幅限制，不能去设计每个编译器:-)
微软的产品往往都在易用性方面做得不错。
.NET在很多方面，也在计算机语言的设计领域做出了贡献。
微软换了新CEO以后，在开放性、拥抱开源方面做得越来越好了。

Jxin

2020-06-11

半路出家学编译原理真吃力。基本看不懂，不过隐约觉得很重要，也有比较强的兴趣（这么秀的东西看不懂实在挠心）。去补编译原理之美了。看来得下一番功夫咯。

作者回复: 加油!
什么都比不过一颗执着的心!

茶底

2020-06-10

最近正好在看asm字节码框架。可以互相印证。

展开

作者回复: Great!

leaf

2020-06-10

请问老师，v8的字节码有类似java字节码的规范吗?

展开

作者回复: 有一个“Ignition: V8 Interpreter”的设计文档可以参考:
https://docs.google.com/document/d/11T2CRex9hXxoJwbYqVQ32yIPMh0uouUZLdyrtmMoL44/edit#

由于v8的字节码只是自己使用，所以没有必要制定公共的标准规范。